

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivica Antolković

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Student:

Ivica Antolković

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz pomoć izv. prof. dr. sc. Suzane Jakovljević, koristeći znanja stečena tijekom studija te navedenu literaturu i rezultate dobivene u eksperimentalnom dijelu.

Zahvaljujem se dr. sc. Saši Kovačiću i stručnom suradniku Ivanu Vovku na iznimnoj pomoći prilikom eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na stručnoj pomoći tijekom izrade rada te na ukazanom povjerenju, trudu i strpljenju. Hvala na savjetima i utrošenom vremenu, temeljitosti te velikoj motivaciji prilikom izrade rada.

Na kraju velika zahvala mojim roditeljima, bratu, bakama i svim ostalim članovima obitelji koji su mi bili najveća podrška i motivacija tokom mog dosadašnjeg školovanja i uz čiju sam pomoć došao do ovog uspjeha.

Ivica Antolković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivica Antolković**

Mat. br.: 0035202015

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Trošenje alata za izvlačenje elipsi metalnog lima

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Wear of tools for drawing elipsis on metal sheets

Opis zadatka:

Izvlačenjem elipsi na metalnim limovima omogućava se protuklizno svojstvo osobnih vozila te njihov jednostavniji i sigurniji smještaj pri prijevozu na teretnim vozilima.

Prilikom izvlačenja elipsi dolazi do trošenja površine alata za izvlačenje elipsi na mjestu dodira alata i metalnog lima.

U radu je potrebno:

- 1) definirati materijale od kojih se izrađuju alati za izvlačenje elipsi,
- 2) analizirati i opisati mehanizme trošenja koji se javljaju u kontaktu alata i lima,
- 3) na izabranom primjeru karakterizirati mikrostrukturu materijala izabranog alata,
- 4) analizirati rezultate i dati zaključak.

Zadatak zadan:

26. travnja 2018.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

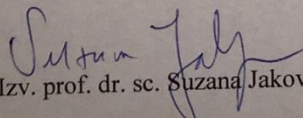
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

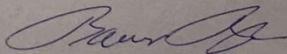
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. PLATFORME ZA PRIJEVOZ AUTOMOBILA.....	3
2.1. Izrada elipsi	3
3. TRIBOLOGIJA	10
3.1. Tribosustav	10
3.2. Trenje	11
3.3. Trošenje.....	13
3.4. Proces trošenja	16
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	19
4.1. Priprema uzorka	19
4.2. Mjerenje tvrdoće	21
4.3. Mikrostruktura.....	23
4.4. SEM analiza	25
5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA I ZAKLJUČAK.....	28
6. LITERATURA.....	29

POPIS SLIKA

Slika 1. Kamion za prijevoz automobila	1
Slika 2. Način vezanja pomoću sigurnosnih traka	2
Slika 3. Platforme spremne za isporuku [3]	3
Slika 4. Izvučene elipse na limu [3]	3
Slika 5. Probijačica "Amada Europe 258" [3].....	4
Slika 6. Dimenzije "elipse" [5]	5
Slika 7. Alat za izvlačenje elipsi [2].....	5
Slika 8. Dijagram postupka cementiranja čelika [7]	7
Slika 9. Mikrostruktura cementiranog čelika [6]	8
Slika 10. Prikaz rezultata pougljičenja u Fe-Fe ₃ C dijagramu [7]	9
Slika 11. Shema jednostavnog tribosustava	11
Slika 12. Jedinični događaj procesa klizanja [8]	12
Slika 13. Jedinični događaj abrazije [8]	13
Slika 14. Jedinični događaj adhezije [8].....	14
Slika 15. Jedinični događaj umora površine [8]	15
Slika 16. Jedinični događaj tribokorozije [8]	16
Slika 17. Opći oblik procesa trošenja [8]	16
Slika 18. Shema tribosustava pri udarnom trošenju [8]	17
Slika 19. Procesi trošenja tribosustava s udarnim opterećenjem [8]	17
Slika 20. Alat izrezan na dijelove.....	20
Slika 21. Uzorak za ispitivanje.....	20
Slika 22. Uzorak zaliven u polimernoj masi	21
Slika 23. Tvrdomjer INSTRON.....	21
Slika 24. Raspored tvrdoća od ruba prema jezgri (niz kaljenja)	23
Slika 25. Mikrostruktura ruba pod povećanjem od 500x	23
Slika 26. Mikrostruktura ruba pod povećanjem od 1000x	24
Slika 27. Mikrostruktura jezgre pod povećanjem od 500x	24
Slika 28. Mikrostruktura jezgre pod povećanjem od 1000x	25
Slika 29. Skenirajući elektronski mikroskop.....	25
Slika 30. Površina potrošenog dijela alata promatrana SEM-om pod povećanjem od 668x... 26	

Slika 31. Površina potrošenog dijela alata promatrana SEM-om pod povećanjem od 866x...26

POPIS TABLICA

Tablica 1. Iznosi izmjerenih tvrdoća	22
--	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_n	N	normalna komponenta opterećenja
F_t	N	tangencijalna komponenta opterećenja
F_{tr}	N	silatrenja
μ		faktortrenja
ϑ	°C	temperatura
v	$\frac{m}{s}$	brzina
V	m ³	volumen
t	h	vrijeme

SAŽETAK

U ovom radu navedeni su materijali koji se koriste za izradu alata za izvlačenje metalnog lima. Objašnjena je primijenjena toplinska obrada cementiranja alata koja je potrebna zbog posebnih zahtjeva na svojstva materijala alata. Također su navedeni i objašnjeni procesi i mehanizmi trošenja do kojih dolazi zbog udarnog rada alata.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja tvrdoće materijala i analiza mikrostrukture te je na temelju dobivenih rezultata donesen zaključak.

SUMMARY

This paper deals with materials used for drawing sheet metals. Heat treatments required due to specific required mechanical properties, are explained. Wear mechanisms caused by impact tooling are listed and explained.

Experimental part consists of hardness testing and microstructural analysis, and obtained results were used to develop a conclusion.

1. UVOD

Razvoj automobilske industrije nakon 1930. godine jako se ubrzao. Usavršena je konstrukcija vozila, motori su postali snažniji, lakši i ekonomičniji, povećana je brzina. Pritom se kao pogodan za pogon gospodarskih vozila (teretni i srodni automobili te autobusi) ustalio Dieslov motor, a za pogon osobnih automobila Ottov (benzinski) motor. Danas se proizvode velike količine automobila i to na dnevnoj bazi na više lokacija diljem svijeta.[1] Kako raste ponuda automobila, automatski dolazi do povećanja potražnje. Zbog tog razloga, bitna je dobra organizacija transporta automobila od tvornice do auto-kuća, odnosno kupaca. Svakodnevno možemo vidjeti mnoštvo kamiona na prometnicama koji prevoze automobile. To su specijalizirani kamioni za prijevoz automobila opremljeni na poseban način i prilagođeni takvoj vrsti tereta, slika 1.



Slika 1. Kamion za prijevoz automobila [2]

Prijevoz automobila zahtijeva visoku razinu sigurnosti transporta. Važno je na propisani način onemogućiti pokretanje vozila prilikom transporta na kamionu kako ne bi došlo do oštećivanja vozila, ali i da se izbjegne ugrožavanje ostalih sudionika u prometu, slika 2.



Slika 2. Način vezanja pomoću sigurnosnih traka [2]

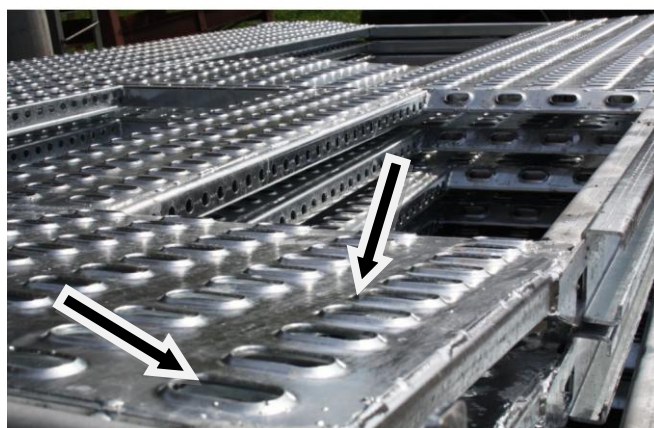
2. PLATFORME ZA PRIJEVOZ AUTOMOBILA

Jedan od najvažnijih čimbenika sigurnosti prilikom transporta vozila su platforme na koje se navoze automobili, slika 3. Osim posebnih zahtjeva na vrstu materijala (limovi sa visokom granicom tečenja za hladno preoblikovanje EN10149-2/EN10051, kvaliteta S420MC, 2,5 ili 4 mm debljine), bitan je dizajn tih platformi, odnosno svaki dio platforme treba biti funkcionalan.

Na površini platforme nalazi se mnoštvo eliptičnih izbočina koje imaju višestruku važnost, slika 4. Te elipse imaju protuklizno svojstvo, odnosno sprečavaju pomicanje vozila prilikom transporta i omogućuju lakši navoz automobila. S druge strane, elipse omogućavaju pričvršćivanje traka za vezanje tereta na platformi jer uz točne dimenzije elipsa omogućeno je i lako stavljanje i vađenje trake iz elipse. Sve navedene prednosti omogućavaju sigurnost transporta i uštedu vremena. [2]



Slika 3. Platforme spremne za isporuku [3]



Slika 4. Izvučene elipse na limu [3]

2.1. Izrada elipsi

Elipse na metalnom limu se izrađuju izvlačenjem pomoću probijačice „Amada Europe 258“, slika 5. Neke od specifikacija navedene probijačice su:

- mogućnost postizanja sile od 20 tona,
- probijanje lima do 6 mm debljine,
- dimenzije stola za rad su 2x1,25 metara,
- probijanje i izvlačenje vrši se uz pomoć hidrauličnog stroja,
- može se koristiti 31 alat na 3 rotirajuće stanice.[3]



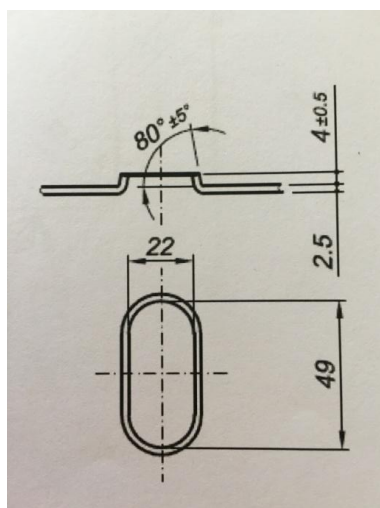
Slika 5. Probijačica "Amada Europe 258" [3]

2.1.1. Probijanje i izvlačenje lima

Za izradu platformi koriste se limovi sa visokom granicom tečenja za hladno preoblikovanje EN10149-2/EN10051, kvalitete S420MC i debljine 2,5mm ili 4 mm. Ovisno o teretu, limovi debljine 2,5 mm koriste se za izradu platformi za prijevoz automobila, dok se limovi debljine 4 mm koriste za platforme za prijevoz kamiona i većih vozila. [2] Proces probijanja se sastoji od tri faze, analogno fazama u procesu odrezivanja. U prvoj fazi je materijal pod djelovanjem tlačne sile prosjekača izložen naprezanju na elastično savijanje. To savijanje u određenom trenutku prelazi u plastično savijanje kod kojeg dolazi do istezanja materijala.

U drugoj fazi nastaju znatne deformacije ispod prosjekača tj. materijal se savija i utiskuje u otvor prstena za prosijecanje kod kojeg dolazi do plastične deformacije zbog utjecaja vanjskih sila.

U trećoj fazi zbog vrlo male debljine prstenastog elementa koji se deformira dolazi do prekoračenja stupnja deformacije. Dolazi do pojave prvih napuklina ispred reznih rubova alata te do konačnog prekida materijala i istiskivanja jezgre. Najveća relativna dubina prodiranja prosjekača kod koje dolazi do razdvajanja materijala ovisi o vrsti i debljini materijala te o stanju reznih oštrica. U ovisnosti o vrsti materijala s povećanjem tvrdoće pada dubina. Ako su rezne oštrice tupe potrebna je veća dubina prodiranja prije pojave pukotina.[4] Nakon probijanja, na istoj probijačici, mijenja se alat i slijedi postupak izvlačenja lima. Izvlačenjem se pomoću posebno dizajnirane matrice (žiga) dobiva konačni oblik elipse sa točno propisanim dimenzijama, slika 6.



Slika 6. Dimenzije "elipse" [5]

2.1.2. Alat za izvlačenje elipsi

Samo izvlačenje obavlja se pomoću posebno dizajniranog alata samo za tu namjenu, slika 7. Oblik i dimenzije alata definirani su dimenzijama elipse, a čije su funkcije prethodno objašnjene. Alat se izrađuje od alatnog čelika koji se naknadno podvrgava postupku toplinske obrade cementiranja.



Slika 7. Alat za izvlačenje elipsi [2]

2.1.3. Materijal alata za izvlačenje elipsi

Alati za izvlačenje i probijanje izrađuju se od alatnih čelika. Zbog visokih opterećenja u radu i specifičnih funkcija alata, od čelika se zahtijevaju i posebna svojstva kao npr. visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, postojanost tvrdoće pri povišenim radnim temperaturama i druga.

Alatni čelici se, u pravilu, primjenjuju u toplinski obrađenom stanju, primarno zakaljeni i popušteni. Alternativno ili dodatno se provode i neki od postupaka za oplemenjivanje površine. Zbog navedenih traženih svojstava i potrebe zakaljivanja te što boljeg prokaljivanja ti čelici u pravilu imaju viši maseni udio ugljika od konstrukcijskih čelika. Uz to, kod strožih zahtjeva, legiraju se s takvim elementima koji omogućuju postizanje željenih svojstava u uporabi. Isporučuju se u toplo valjanom, hladno vučenom, kovanom, lijevanom stanju u obliku šipki, traka i ploča.

S obzirom na kemijski sastav alatni čelici mogu biti [6]:

- nelegirani,
- niskolegirani i
- visokolegirani.

Prema radnoj temperaturi i uvjetima primjene čelici se dijele na sljedeće podskupine:

- alatni čelici za hladni rad,
- alatni čelici za topli rad i
- brzorezni čelici.

Primarni (temeljni) zahtjevi i svojstva alatnih čelika:

- otpornost na trošenje,
- žilavost i
- otpornost na popuštanje, koja se katkad također pojavljuje kao osnovni kriterij izbora čelika iako je to svojstvo specifično samo za čelike koji su izvrgnuti povišenim temperaturama u radu ($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

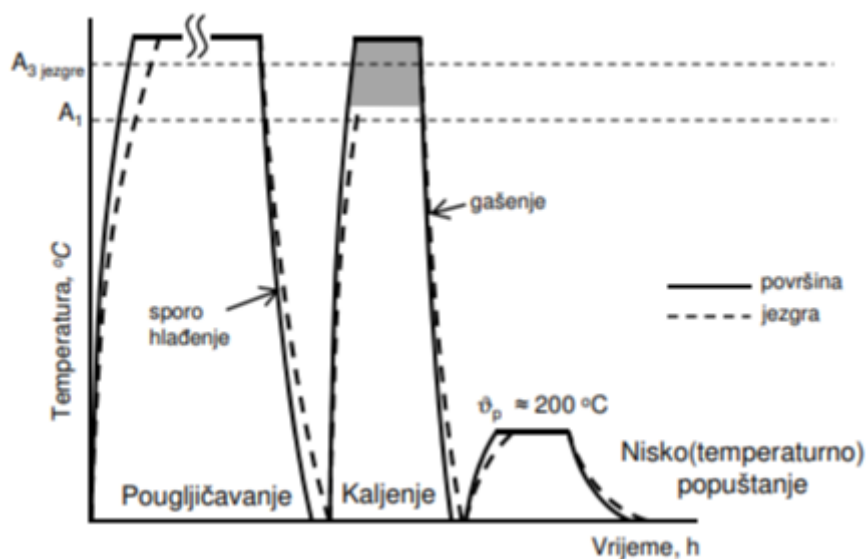
Proizvodni i ekonomski (sekundarni) zahtjevi i svojstva:

- mogućnost obrade alata (rezljivost)
- što veća zakaljivost i prokaljivost
- što manja sklonost pogrubljenju zrna prilikom austenitiziranja
- što manje deformacije pri kaljenju
- sigurnost protiv pojave pukotina i lomova tijekom toplinske obrade
- što manja sklonost razugljičenju prilikom toplinske obrade
- mogućnost prebrušavanja u radu i prikladnost za poliranje
- dovoljna otpornost na koroziju
- mogućnost nabave i što manja cijena [6]

2.1.4. Toplinska obrada-cementiranje alatnog čelika

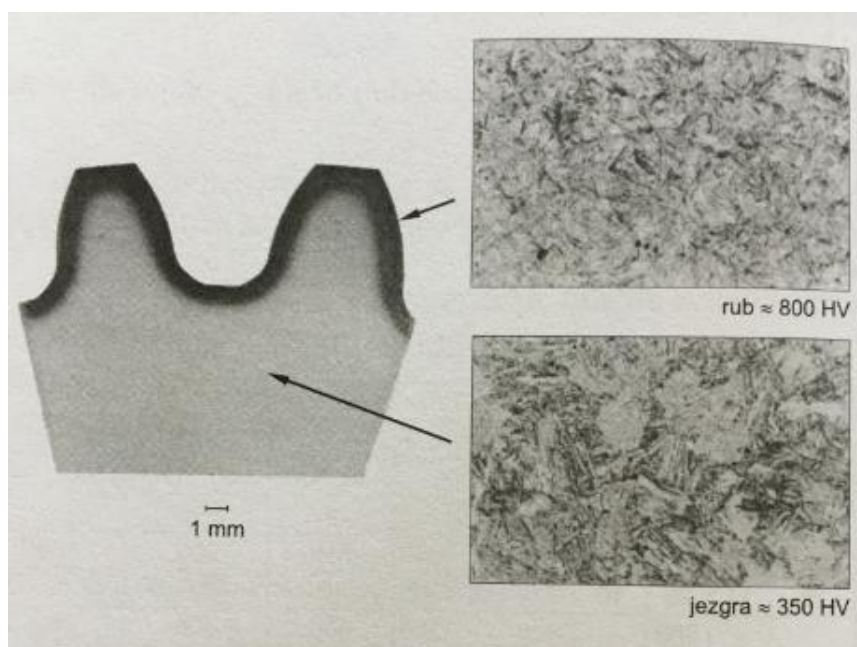
Cementiranje čelika je postupak obradbe koji se sastoji od termokemijske obradbe pougljičenja (obogaćivanja površinskih slojeva proizvoda ugljikom), kaljenja pougljičenog proizvoda i niskotemperaturnog popuštanja, slika 8. [7]

Osnovni je cilj cementiranja postizanje tvrdih površinskih slojeva strojnog dijela otpornih na trošenje (visoka tvrdoća), a da pri tom jezgra strojnog dijela postigne što višu otpornost na udarna opterećenja (žilavost), slika 9. Za cementiranje su naročito prikladni ugljični i niskolegirani čelici s maksimalno 0,25 %C.



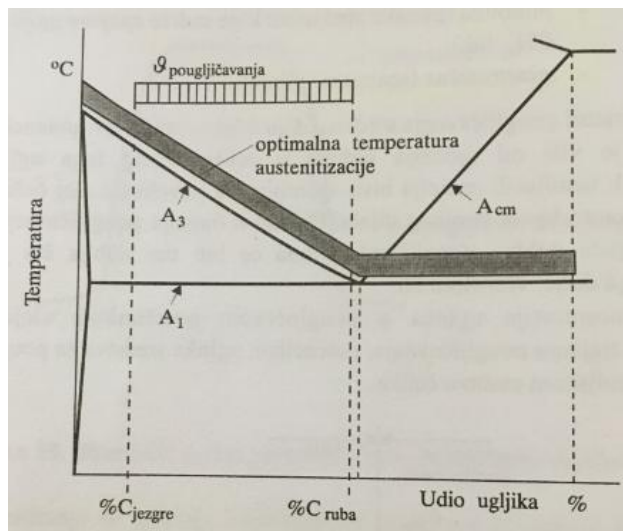
Slika 8. Dijagram postupka cementiranja čelika [7]

Za cementiranje se uzimaju niskougljični čelici, jer bi samim kaljenjem ili postizali visoku žilavost, ili je barem zadržavali onakvom kakva je bila prije kaljenja. No kako ti čelici samim kaljenjem ne postižu visoku površinsku tvrdoću, to im treba prikladnim toplinskim postupkom povišati sadržaj ugljika u površinskim slojevima, kako bi ovi postali bolje zakaljivi. Prema tome, nositelj otpornosti na udarna opterećenja cementiranog strojnog dijela biti će njegova jezgra, a nositelj otpornosti na trošenje njegovi površinski slojevi. [7]



Slika 9. Mikrostruktura cementiranog čelika [6]

Postupak pougljičavanja provodi se u sredstvu koje je u stanju da na temperaturi austenitizacije čelika (900 do 950 °C) predaje čeliku ugljik, slika 10. Dubina površinskih slojeva obogaćena ugljikom iznosi obično 0,5 do 1,5 mm. Naime, taj udio ugljika narastao je u vanjskom dijelu površinskog sloja na oko 0,7 do 0,8 %C. Taj udio postupno pada idući od površine prema jezgri, a padom udjela ugljika postupno pada i tvrdoća. Na dubini 0,5 do 1,5 mm koncentracija ugljika pala je na onu početnu, tj. jezgra nije obogaćena ugljikom. Sredstva za pougljičavanje mogu biti: kruta (granulati koji se sastoje od smjese drvenog ugljena kao nositelja ugljika, aktivatora BaCO_3 i veziva), tekuća (rastaljene soli kalijeva i natrijeva cijanida i odgovarajućih aktivatora), plinovita (CO , CH_4) i plazmatična (ionizirani plinovi).



Slika 10. Prikaz rezultata pougljičenja u Fe-Fe₃C dijagramu [7]

Temperatura austenitizacije pri kaljenju nakon pougljičenja ne može istovremeno biti optimalna za (visokouglični) rubni sloj i za (niskougličnu) jezgru jer se koncentracije ugljika znatno razlikuju. Zbog toga je izbor temperature austenitizacije često povezan s kompromisom jer izabrana temperatura austenitizacije ne može biti optimalna za rubni sloj i jezgru. Ako su svojstva rubnog sloja važnija od svojstava jezgre izabire se niža temperatura austenitizacije. U suprotnom slučaju, ako su važnija svojstva jezgre, izabire se viša temperatura austenitizacije koja je optimalna za kaljenje niskouglične jezgre pougljičenog čelika. [7]

Osim cementiranja koji je jedan od najčešćih postupaka toplinsko kemijskih obradbi, danas se još primjenjuju u strojarskoj proizvodnji nitriranje, karbonitriranje, nitrokarburiranje i boriranje.

Postoji još mogućnost toplinskog prevlačenja alata. Neki strojni dijelovi, najčešće alati, nakon kaljenja i popuštanja te završne strojne obradbe toplinski se prevlače tankim, ali vrlo tvrdim slojevima u svrhu povišenja otpornosti na trošenje, a time i produljenja njihove trajnosti. Prevlače se slojevima oksidnih keramičkih spojeva (Al₂O₃), neoksidnim keramičkim spojevima (TiC, TiN, TiCN), a u najnovije vrijeme i slojevima dijamanta i dijamantu sličnih spojeva. [7]

3. TRIBOLOGIJA

Naziv tribologija dolazi od grčkog τριβος što znači trenje, trošenje i slično. Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju i o pratećim aktivnostima. Ovo je prijevod službene definicije, prvi put objavljene 1966. Godine u izvještaju Radne grupe Ministarstva prosvjete i znanosti Ujedinjenog Kraljevstva, koju je vodio P. Jost. Jednostavnije i razumljivije bi se moglo reći da je tribologija znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja. [8]

Glavna područja primjene tribologije su:

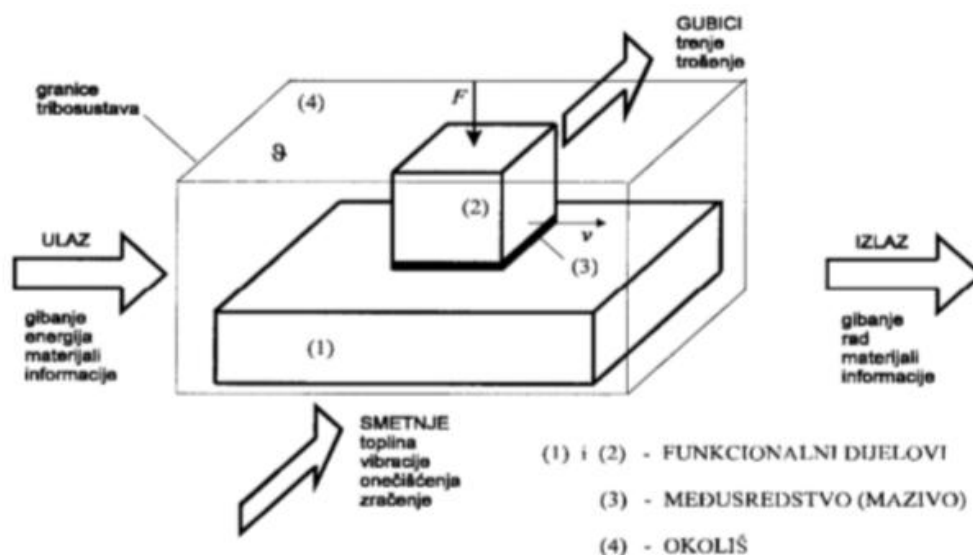
- podmazivanje (ulja, masti, aditivi)
- obradba materijala (sredstva za hlađenje i podmazivanje, alatni materijali, lakoobradivi materijali)
- mehaničke konstrukcije (zupčanici, ležaji, klizni elementi),
- materijali (novi materijali, keramika, polimeri, metali, inženjerstvo površina)

Tribološke mjere, tj. postupci i metode kojima je cilj postizanje prihvatljivih vrijednosti trenja i trošenja u realnim tribosustavima, mogu se podijeliti na 4 dijela:

- Izbor materijala triboelemenata
- Zaštita površina od trošenja
- Uhodavanje
- Podmazivanje [8]

3.1. Tribosustav

Pri rješavanju triboloških problema treba uzeti u obzir sve dijelove tribosustava, uvjete rada, protok kroz sustav (gibanja, energije, materijala i informacija), smetnje, gubitke i sva važna međudjelovanja, slika 11.



Slika 11. Shema jednostavnog tribosustava [8]

3.2. Trenje

Za ostvarenje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba savladati silu trenja. Prema definiciji, trenje je sila ili otpor koja se suprotstavlja relativnu kretanju krutih tijela u dodiru. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja. Faktor proporcionalnosti koji povezuje silu trenja i normalnu silu zove se faktor trenja. Često se koristi i naziv koeficijent trenja. Faktor trenja je, dakle, bezdimenzijski omjer sile trenja između dva tijela i normalne sile kojom tijela pritišću jedno o drugo:

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_n} \quad (1)$$

3.2.1. Vrste trenja

a) Prema agregatnom stanju:

- trenje među krutim površinama
- trenje među dijelovima fluida, odnosno između krutog tijela i fluida

b) Prema podmazivanju:

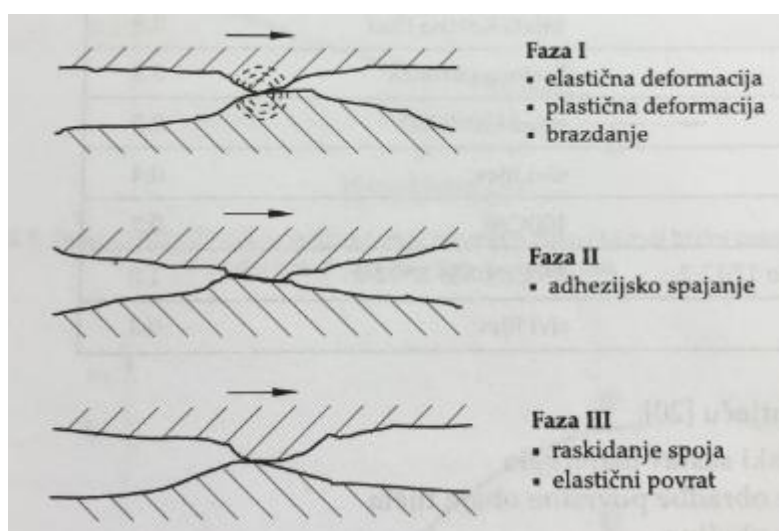
- suho trenje
- trenje uz podmazivanje

c) Prilikom pokretanja tijela razlikujemo:

- trenje mirovanja (statičko trenje)
- trenje kretanja (kinetičko, dinamičko trenje)

d) Trenje klizanja

Trenje klizanja nastaje između dva elementa tribosustava. Jedan zakon trenja kaže da je trenje neovisno o površini kontakta krutih tijela. Međutim, stvarni dodir dviju površina razlikuje se od prividnoga, geometrijskog. Objašnjenje podrijetla sile trenja dano je slikom koja prikazuje jedinični događaj procesa klizanja, slika 12, tj. slijed zbivanja od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina. [8]



Slika 12. Jedinični događaj procesa klizanja [8]

Na trenje utječu: -kemijski sastav materijala

- stanje obradbe površine obaju tijela
- sastav okoline
- opterećenje
- brzina kretanja
- način kretanja (pravocrtno, krivudavo, naprijed-natrag)
- vrste kontakta (površinski, koncentrirani)
- temperature
- prethodno klizanje po toj površini [8]

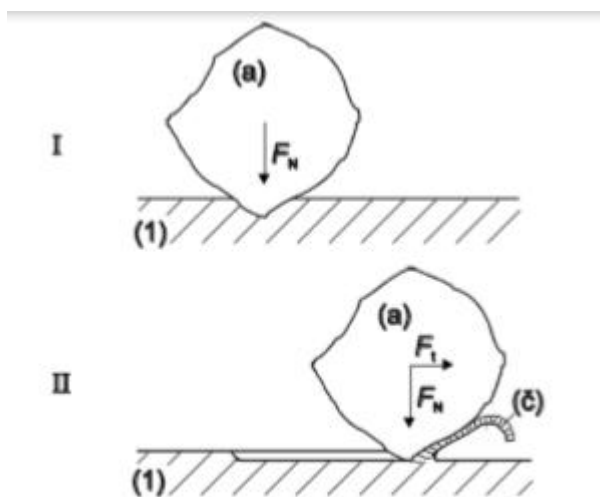
3.3. Trošenje

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela poradi dinamičkog dodira s drugim tijelom, fluidom i/ili česticama. Premda postoji neizbrojivo velik broj primjera trošenja, većina je autora suglasna da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija.

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina. [8]

3.3.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, slika 13. [8]



Slika 13. Jedinični događaj abrazije [8]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

I. faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N .

II. faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t .

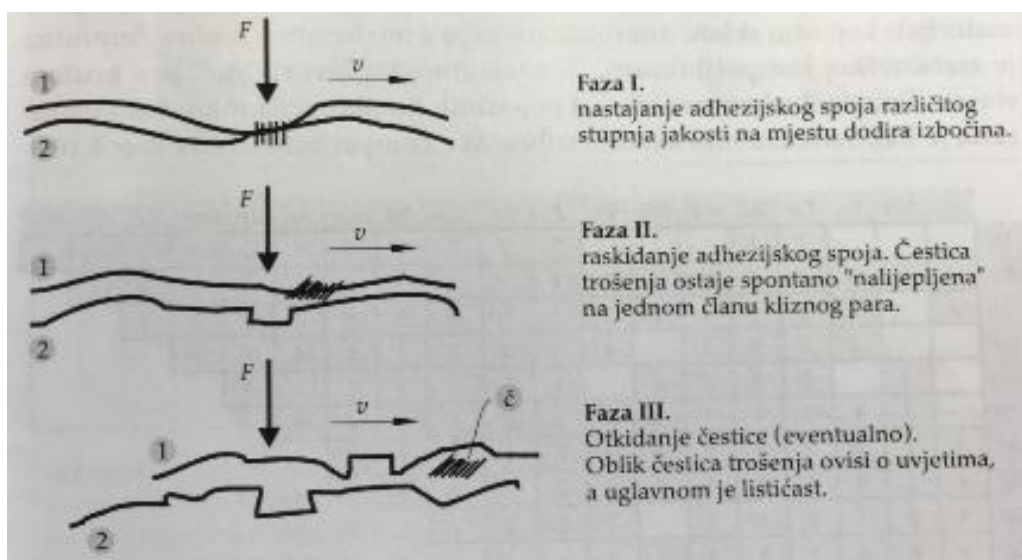
Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja:

- 1.) „Čista“ abrazija-djeluje kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine, kada je abradirani materijal krhak.
- 2.) Selektivna abrazija-djeluje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv „reže“ samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze
- 3.) „Nulta“ abrazija-nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskoga graničnoga sloja. Nulta abrazija najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine (boriranje, vanadiranje, CVD, PVD, itd.). [8]

3.3.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnu gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Čestice iščupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno „nalijepljene“ odnosno navarene na drugu kliznu površinu. [8]

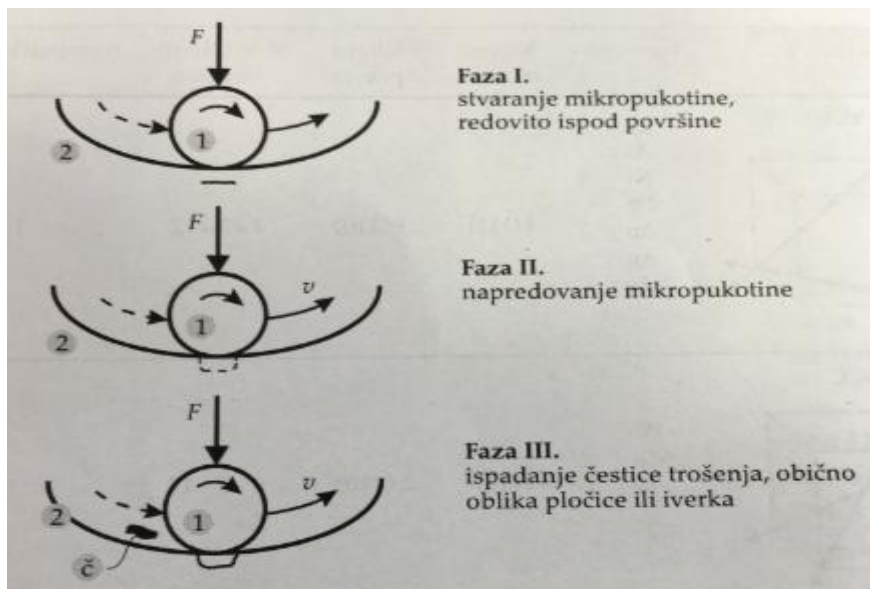
Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze, slika 14:



Slika 14. Jedinični događaj adhezije [8]

3.3.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine zbog cikličkih promjena naprezanja. Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 15 [8]:



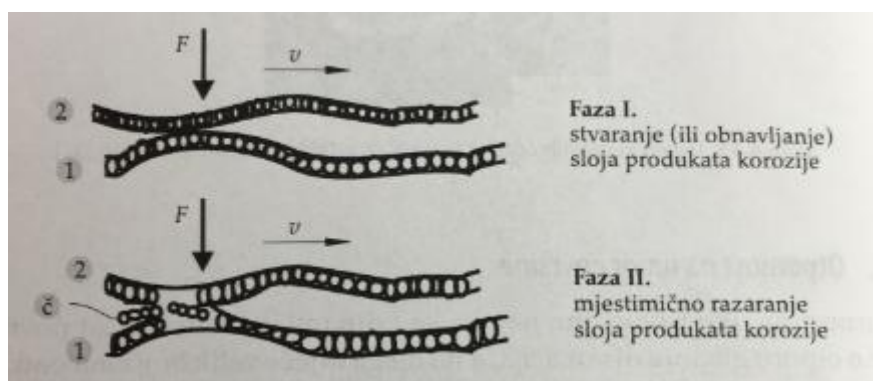
Slika 15. Jedinični događaj umora površine [8]

U prvoj fazi nastaje potpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje pri koncentriranom dodiru (tzv. Hertzovo naprezanje) uvijek ispod same površine. To je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica. U drugoj fazi potpovršinska pukotina izbija na površinu. Od tog trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika iverka, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se taj oblik trošenja uobičajeno naziva „pitting“ ili rupičanje.

Otpornost na umor površine naziva se i dinamička izdržljivost površine. Ovisi o otporu gibanju dislokacija, a na njega utječe velik broj čimbenika: potpovršinski koncentratori naprezanja, površinska obilježja, površinske pogreške, diskontinuiteti u geometriji dodira, raspodjela opterećenja u ležaju, elastohidrodinamika i tangencijalne sile. [8]

3.3.4. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj tribokorozije s dvije faze prikazuje slika 16. [8]

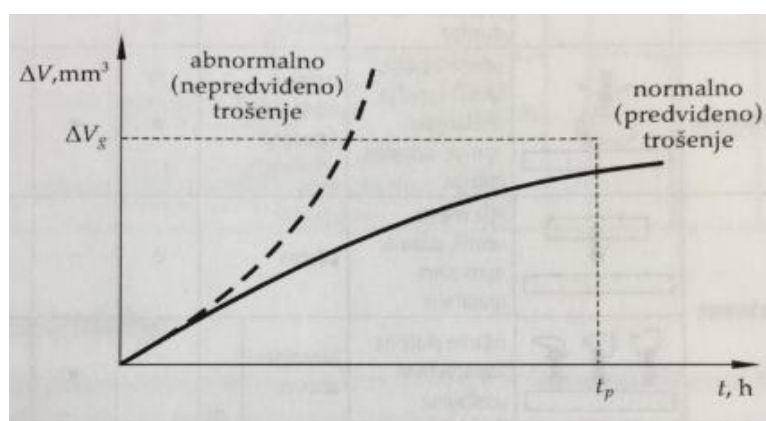


Slika 16. Jedinični događaj tribokorozije [8]

Najvažniji čimbenik otpornosti na tribokoroziju je kemijska pasivnost materijala u određenom mediju. Tribokorozija je u pravilu „poželjan“ mehanizam trošenja jer slojevi proizvoda korozije zaštićuju metalne površine od neposrednog dodira metal/metal.

3.4. Proces trošenja

Svaki proces trošenja sastoji se od dva mehanizma trošenja ili više njih, koji istodobno ili u vremenskom slijedu, ovisno o vrsti tribosustava, relativnu gibanju i radnim uvjetima. Cilj tribologije je primjenom odgovarajućih triboloških mjera postići da određeni tribosustav funkcionira pretežno u režimu tzv. normalnog trošenja, slika 17. [8]

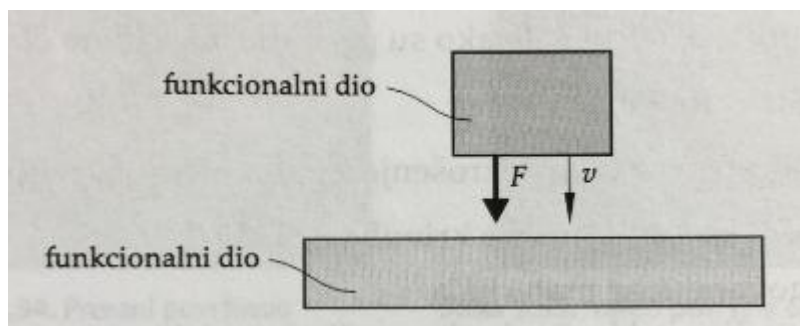


Slika 17. Opći oblik procesa trošenja [8]

Prema vrsti elemenata tribosustava, vrsti dodira, načinu opterećivanja i obliku relativnog gibanja razlikuju se sljedeći slučajevi trošenja: klizno trošenje, kotrljajuće trošenje, udarno trošenje, fretting (izjedanje), abrazija, erozija česticama, erozija kapljevnom, kavitacija. [8]

3.4.1. Udarne trošenje

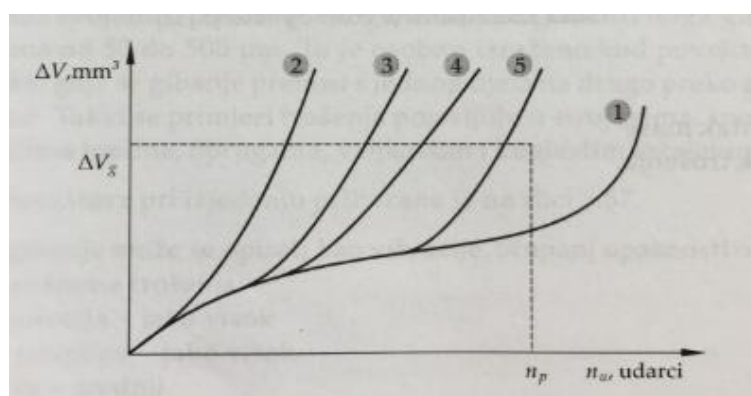
Proces trošenja u kojem je dominantan mehanizam umor površine nazivamo udarno trošenje. Shema tribosustava pri udarnom trošenju prikazana je na slici 18:



Slika 18. Shema tribosustava pri udarnom trošenju [8]

Relativno gibanje može se opisati kao udarci. Stupanj opasnosti od pojedinih mehanizama trošenja je slijedeći: umor površine-jako visok, abrazija-srednji, adhezija-srednji, tribokorozija-najniži.[8]

Karakteristični primjeri tribosustava s udarnim opterećenjem jesu: kontakti, releji, dijelovi printera, ventili, kovački alati, ukovnji, mlinovi, štanice itd. Moguće promjene iznosa trošenja tijekom udarnog rada prikazane su na slici 19.



Slika 19. Procesi trošenja tribosustava s udarnim opterećenjem [8]

Krivulja 1 – prihvatljiv proces trošenja (uglavnom tribokorozijski)

Krivulja 2 – adhezijsko trošenje

Krivulja 3 – deformacijsko trošenje (prekomjerna plastična deformacija istiskivanjem materijala zbog udara)

Krivulja 4 – abrazijsko trošenje ako u prisutne abrazivne čestice

Krivulja 5 – umor površine

Tribološke mjere za izbjegavanje krivulja 2, 3, 4 i 5: izbor odgovarajućeg materijala, zaštita površine od trošenja zbog teško pomirljivog zahtjeva na žilavost (zbog udarnog djelovanja) i otpornost na ostale mehanizme trošenja. [8]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Tema ovog rada je analiza trošenja alata za utiskivanje elipsi, slika 20. Materijal alata i toplinska obrada objašnjeni su u prethodnom dijelu rada. Očekivani broj udaraca na probijačici, tj. broj probijanja bio je 700 000-800 000. Međutim, s vremenom je došlo do trošenja alata na probijačici, točnije, već nakon 150 000 probijanja oblik elipse nije odgovarao zahtijevanim dimenzijama kupca.

Kako je prilikom izvlačenja vrh žiga najviše u kontaktu s limom, on se najviše i troši, a sam vrh ima točno određen kut nagiba koji je najbitniji segment ove proizvodnje.

Zbog takve situacije proizvođač je prisiljen ponovno prilagoditi alat zahtjevima te brušenjem oblikuje alat na određene dimenzije te se ponovno izlaže toplinskoj obradi kako bi se dobio alat sa visokom površinskom tvrdoćom i žilavom jezgrom. Nakon tog postupka, alat je ponovno bilo moguće koristiti još neko vrijeme, ali usprkos tome ponovno je došlo do trošenja alata i pogrešnih dimenzija obratka.

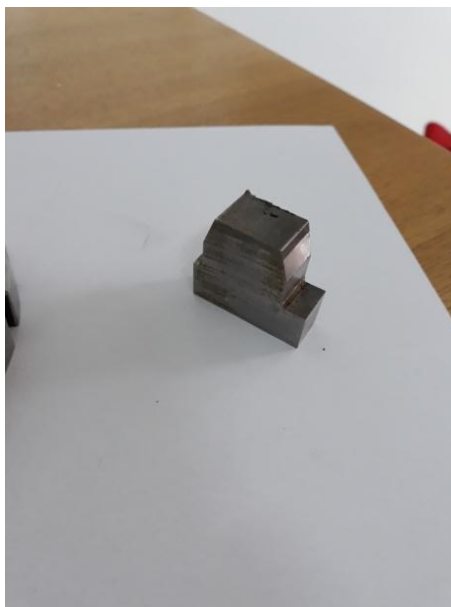
Zbog opisanih problema odlučeno je ispitati svojstva materijala samog alata te koji je mehanizam trošenja u pitanju i zašto dolazi do problema u proizvodnji. [2]

4.1. Priprema uzorka

Kako bi se mogla promatrati struktura materijala mikroskopom, potrebno je imati reprezentativan uzorak zadovoljavajućih dimenzija. Alat je izrezan na manje dijelove te je izuzet jedan uzorak prikladan za daljnju pripremu, slika 21.



Slika 20. Alat izrezan na dijelove



Slika 21. Uzorak za ispitivanje

U Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pripremljen je uzorak vrućim zalijevanjem u polimernu smjesu. Zatim brušen (brusni papiri P120, P320, P500, P1000, P2400 i P4000), poliran (dijamantna pasta $3\mu\text{m}$ i $1\mu\text{m}$) i nagrižen 3%-tnom otopinom nitala kako bi se uz pomoć svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 analizirala mikrostruktura uzorka.



Slika 22. Uzorak zaliven u polimernoj masi

4.2. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće provedeno je na tvrdomjeru INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B, slika 23.



Slika 23. Tvrdomjer INSTRON

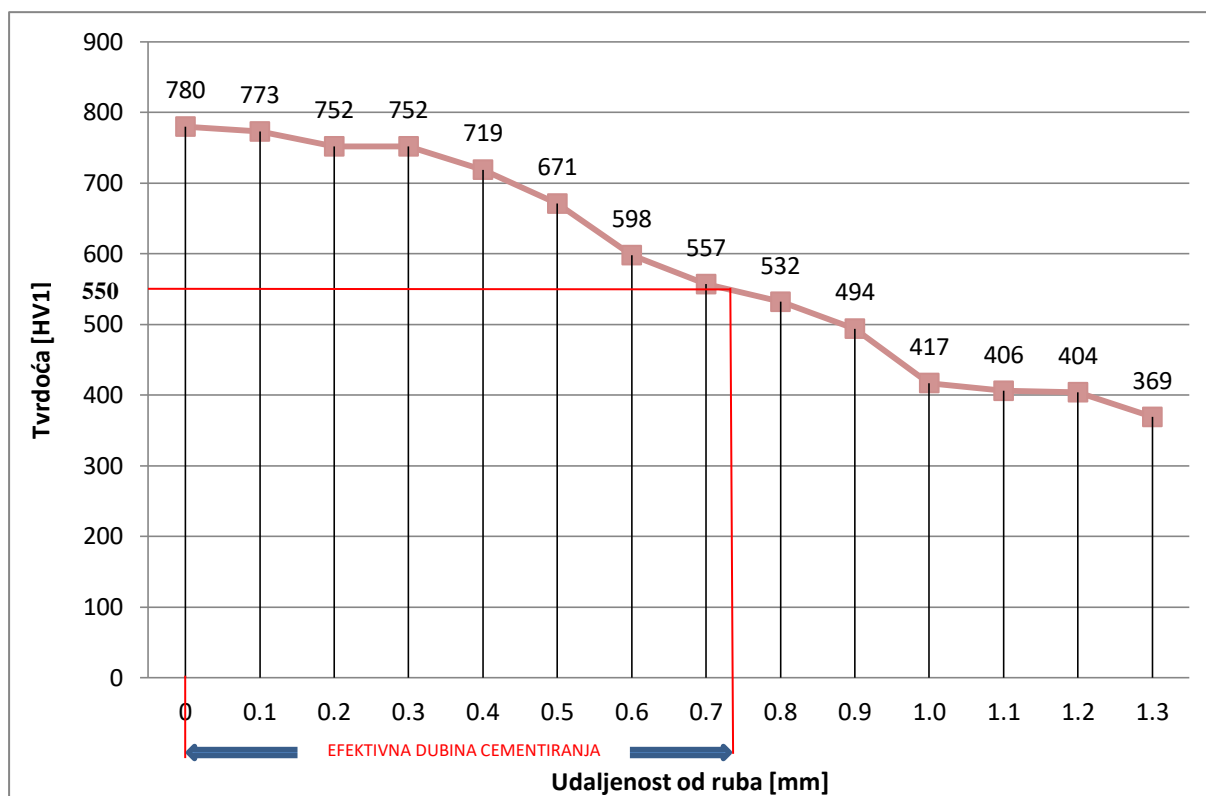
Tvrdoća je mjerena Vickers metodom. Penetrator je četverostrana istostranična dijamantna piramida i na početku mjerenja namještamo sve potrebne parametre na uređaju. Mjerenje se provodi od ruba prema jezgri sa pomicanjem penetratora za 0,1 mm.

Provedeno je 14 mjerenja tvrdoće čiji su rezultati prikazani u Tablici 1. :

Tablica 1. Iznosi izmjerenih tvrdoća

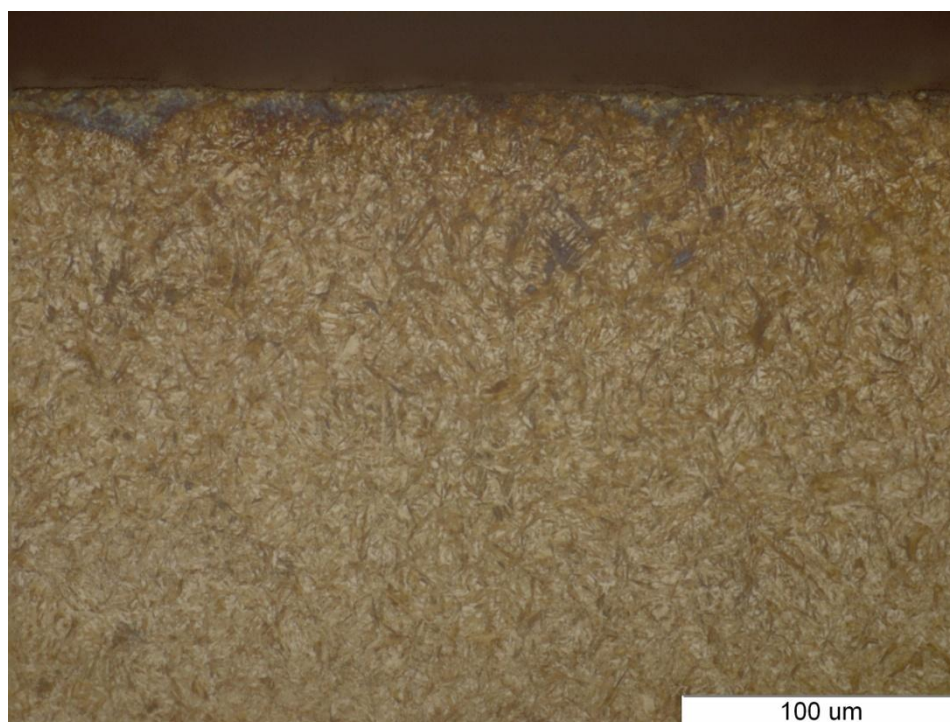
Udaljenost od ruba [mm]	Tvrdoća HV1
0	780
0,1	773
0,2	752
0,3	752
0,4	719
0,5	671
0,6	598
0,7	557
0,8	532
0,9	494
1,0	417
1,1	406
1,2	404
1,3	369

Na temelju izmjerenih tvrdoća napravljen je dijagram niza kaljenja, slika 24., te je označena efektivna dubina cementiranja. Efektivna dubina cementiranja (CHD) određuje se prema normi HRN ISO 15787:2001 kao ona okomita udaljenost od ruba do mjesta gdje je postignuta granična tvrdoća od 550 HV1.

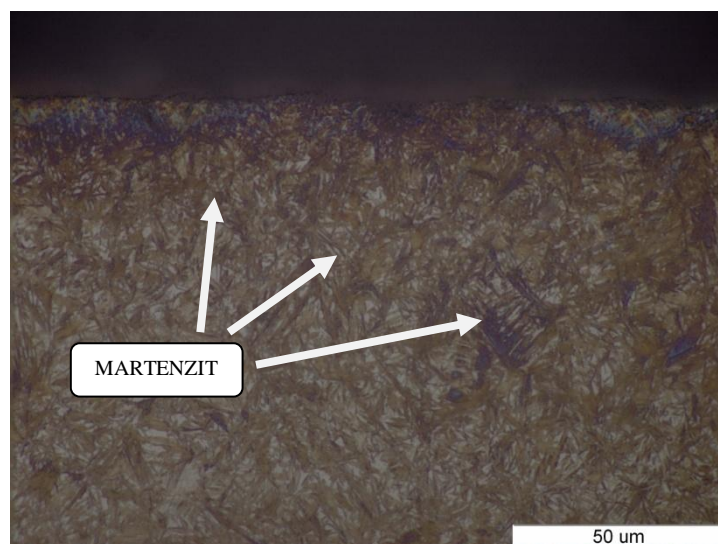


Slika 24. Raspored tvrdoća od ruba prema jezgri (niz kaljenja)

4.3. Mikrostruktura



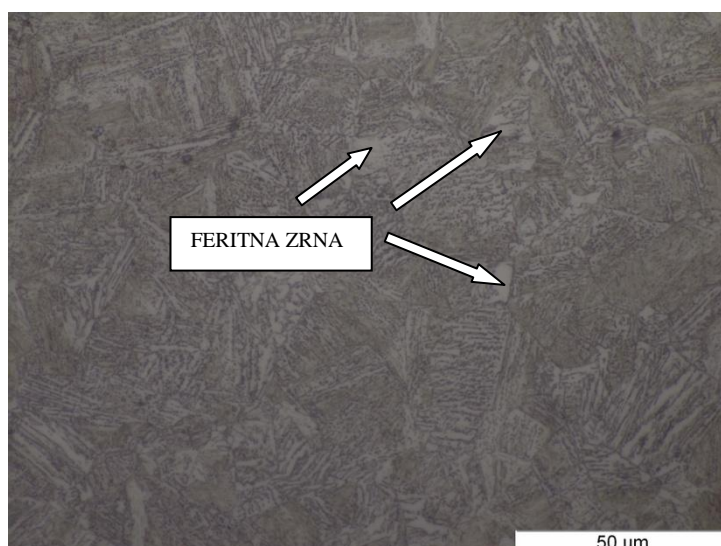
Slika 25. Mikrostruktura ruba pod povećanjem od 500x



Slika 26. Mikrostruktura ruba pod povećanjem od 1000x



Slika 27. Mikrostruktura jezgre pod povećanjem od 500x



Slika 28. Mikrostruktura jezgre pod povećanjem 1000x

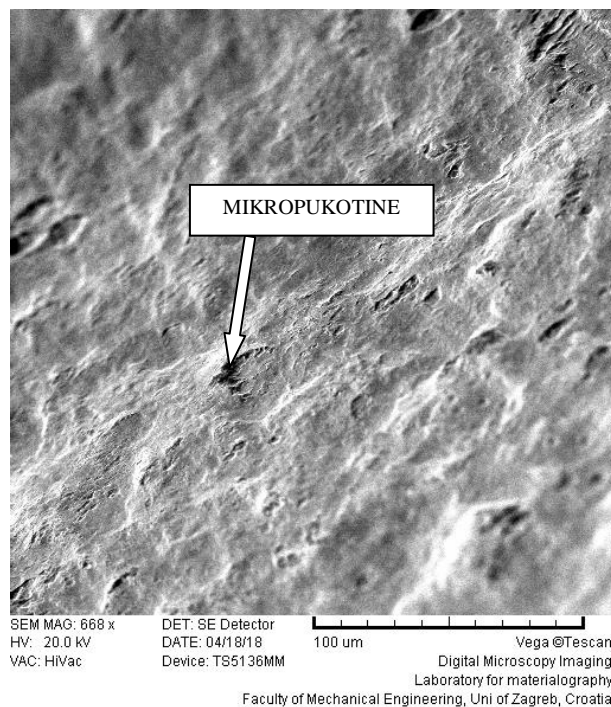
Slike uzorka odgovaraju feritno-perlitnoj mikrostrukturi u jezgri uzorka (slika 28., tamnija zrna-perlit, svjetlija zrna-ferit) budući da taj dio alata dio nije prokaljen, dok u rubnom području (nazubljenje rukavca) prevladava martenzitna struktura dobivena nakon postupka cementiranja, slika 22.

4.4. SEM analiza

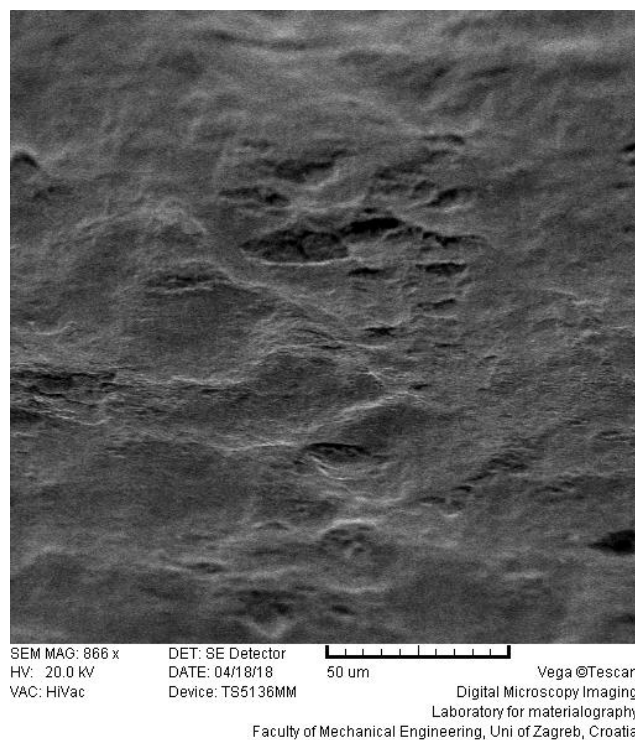
Pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa TESCAN VEGA 5136 MM u laboratoriju za materijalografiju također je provedena analiza mikrostrukture, slika 30.



Slika 29. Skenirajući elektronski mikroskop



**Slika 30. Površina potrošenog dijela alata promatrana SEM-om
pod povećanjem od 668x**



**Slika 31. Površina potrošenog dijela alata promatrana SEM-om
pod povećanjem od 866x**

Pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa moguća je analiza suhih metalnih i nemetalnih uzoraka uz odgovarajuću prethodnu pripremu. Skenirajući elektronski mikroskop VEGA TESCAN TS5136MM opremljen je SE, BSE i EDS detektorima koji omogućuju analize topografije uzoraka, elementnih kontrasta, te mikroanalize kemijskog sastava i mapiranje distribucije kemijskih elemenata u uzorku.

Tehničke karakteristike SEM-a:

- Volframova grijana katoda
- raspon radnog napona ubrzanja 200V– 30kV
- raspon povećanja 15x – 1 000 000x
- maksimalna nazivna razlučivost: 3 nm
- SE, BSE i EDS detektori [9]

SEM analizom, slika 30. i slika 31., jasno su prikazane površine alata na kojima je vidljiv velik broj pukotina i iščupanih dijelova površine alata što dovodi do brzog trošenja alata i upućuje da je glavni mehanizam trošenja ovog alata umor površine, a do čega je došlo zbog kontinuiranog udarnog rada alata.

5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA I ZAKLJUČAK

Nakon detaljne analize uzorka alata probijačice koja je obuhvatila:

- SEM analizu površine alata,
- analizu mikrostrukture uz pomoć optičkog mikroskopa,
- mjerenje tvrdoće po Vickersu (HV1),

može se zaključiti slijedeće:

-Tvrdoća ruba uzorka alata je 780HV1, a tvrdoća jezgre na udaljenosti 1,3mm od ruba iznosi 369HV1. Mikrostruktura odgovara izmjerenim tvrdoćama, odnosno, u rubnom sloju je martenzitna mikrostruktura, dok je u jezgri feritno-perlitna mikrostruktura niže tvrdoće što čini jezgru žilavom.

-SEM analizom je vidljivo da je glavni mehanizam trošenja umor površine do kojeg dolazi zbog kontinuiranog udarnog rada alata te nastaju mikropukotine i dolazi do odvajanja dijelova alata.

-Efektivna dubina cementiranja iznosi 0,74mm što nije dovoljno za uvjete rada ovog alata. Vrijeme cementiranja je bilo prekratko pa se nije postigla dovoljna debljina cementiranog sloja što uzrokuje prebrzo trošenje alata te bi se iz tog razloga trebala provesti duža toplinska obrada. Tim postupkom dobila bi se veća efektivna dubina cementiranja što bi ispunilo zadane uvjete rada probijačice.

6. LITERATURA

- [1] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=4751>
- [2] Dopis tvrtke Metal-Elektro d.d., 24.08.2018.
- [3] <http://www.metal-elektro.hr>
- [4] Musafija, B.: Obrada metala plastičnom deformacijom, Peto izdanje, Svjetlost, Sarajevo, 1988.
- [5] Arhiva nacrtu tvrtke Metal-Elektro d.d., 20.08.2018.
- [6] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sedmo izdanje, FSB, Zagreb, 2013.
- [7] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obradbe metala, FSB, Zagreb, 2001.
- [8] Grilec K., Jakovljević S., Marić G.: Tribologija u strojarstvu, FSB, Zagreb, 2017.
- [9] http://www.mikroskopija.hr/Mikroskopi/FSB_SEM.pdf